矩形通道内泡状流-弹状流转换边界判定方法

金光远 韩月阳

（东北电力大学 能源与动力工程学院，吉林省 吉林市，132012）

摘 要：两相流系统中，流型会直接影响系统的摩擦阻力和传热等特性，而流型的转变过程会受到通道的形状和尺寸的影响。常温常压下，以空气和水为介质，对八种不同尺寸矩形通道中竖直向上泡状流向弹状流转变过程进行了研究。结果表明，矩形通道间隙大于 2 mm时，随着通道水力直径的增大，泡状流向弹状流转换边界左移。在窄通道范围内，可采用Ishii（1977）提出的基于漂移流模型的判定准则计算流型转换边界；在常规矩形通道中，转换准则中的临界空泡份额与气泡初始尺寸有关，选用赵建福提出的方法计算临界空泡份额，转换边界预测结果与实验结果符合程度较好；在利用漂移流方法计算截面含气率时，对于窄矩形通道，分布系数可以用Ishii（1977）提出的方法计算，而对于常规矩形通道，分布系数为 1.2。

关键词：流型转换；泡状流；弹状流；空泡份额；初始尺寸

中图分类号： TL334 **文献标识码：**A

Criterion for Predicting Transition Boundary from Bubbly Flow to Slug Flow in Rectangular Channels

JIN Guang-Yuan HAN Yue-Yang

(School of Energy and Power Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China)

Abstract: Flow pattern transition always affect the frictional resistance and heat transfer in two-phase systems， whereas it itself is also affected by the shape or size of the channels. The transition from bubbly flow to slug flow in eight different rectangular channels was investigated under normal condition. The results shows that the transition boundary from bubbly flow to slug flow moves to left as the diameter increasing when the channel gap is smaller than 2 mm. The transition criteria can be predicted from the model from Ishii（1977）in narrow rectangular channels. While for common channels, the critical void fraction in the transition criteria is relevant to the size of bubbles in entrance, for which calculation method of Jianfu Zhao（2005）is proposed, leading to the predicted transition criteria with a good agreement against the experimental result. When using of drift-flux model, the distribution parameter C_0 in channels is calculated with different forms, and the result shows that correction from Ishii（1977） can be used in narrow size of rectangular channels, while C_0 remains to be 1.2 in common channels.

Key words: Flow transition; Bubbly flow; Slug flow; Void fraction; Initial size

0 引言

两相流系统中，流型的转换会直接影响流动阻力和换热特性的机理，基于流型的经验公式或半经验公式也将随之发生变化，因此研究各种通道中的两相流热工水力特性都要以精确地流型判别为基础。对于矩形通道中流型的研究主要在国外，见文献[1-4]，Sadatomi 等[1]对水力直径超过 10 mm 的竖直上升矩形通道内流型进行研究，发现通道中存在泡状流、弹状流和环状流，当直径超过 10 mm 时，管道的几何形状对流型的影响很小；Mishima 等[2]通过 X 光照相方式对窄矩形通道中的流型进行了研究，在间隙为 1.0 mm 的窄矩形通道中搅浑流没有出现。Wilmarth 和 Ishii 等人[3]对间隙为 1 mm 和 2mm 的水平窄矩形通道，并与 Ishii[5]和 Taitel[6]等关于泡状流向弹状流过渡的模型进行验证，并提出新的用

收稿日期：2017-02-15

基金项目：吉林省教育厅“十三五”科学技术研究项目（No.2016-79），东北电力大学博士科研启动基金资助项目（No. BSJXM-201414）

作者简介：金光远(1987--)，男，讲师，博士学位，主要从事气液两相流与沸腾换热研究。E-mail：ocean06151211@126.com

于计算的分布系数 C_0。Hibiki 等[4]通过对间隙为 0.3—17 mm 的矩形通道流型进行研究，得到了新的关于流型转换的准则。

对于矩形通道内流型转变准则的研究已开展多年，但在该领域得到的结论，尤其是泡状流向弹状流转变的准则有些文献给出的结论是不一致的，本实验选取不同几何尺寸的矩形通道，对于竖直向上泡状流向弹状流转换边界进行研究。

1 实验装置

实验在常温、常压下进行，图 1 中的实线和虚线分别表示水回路和气回路。实验段分别为截面为 43×1.6mm^2（通道一）、43×3mm^2（通道二）和 43×10mm^2（通道三）三种矩形通道，水力直径分别为 3mm、5.6mm 和 16.2mm，长度均为 2000 mm，基于 Kandlikar[7]的定义，通道一为窄矩形通道，通道二、三为常规矩形通道。去离子水由离心泵提供驱动力，经过滤器、调节阀和混合腔进入实验段返回水箱形成循环。空气经气泵压缩后存在储气罐中，使用时经过减压阀和止逆阀进入混合腔、实验段后由实验段上方汽水分离装置进入大气。混合腔中均布若干直径为 1 mm 的毛细管，确保实验段入口处气泡大小接近，发泡均匀。水流量和气流量分别采用不同质量流量计测得，精度分别为 0.1 级和 0.2 级。距实验段入口 500 mm 及 1500 mm 处安装有精度为 0.2 级的压力传感器。正对实验段两测压点中心位置固定安装高速摄影仪，用以拍摄气泡行为。

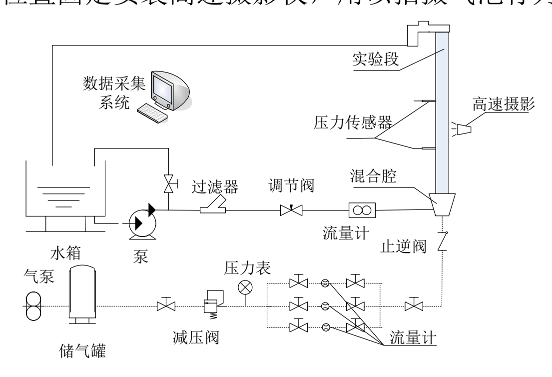


图 1 实验系统图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental system

2 泡状流、弹状流流型的判别

本实验采用高速摄影方式对气水形态进行观测，弥补人眼对于高速流体辨识不清的缺点。文献[1-4]中对于常规矩形通道和窄矩形通道中的泡状流和弹状流的描述是不同的，图 2 中给出了实验中不同矩形通道中泡状流和弹状流的示意图。

在常规通道中，泡状流内气泡是以彼此分离的小泡形式分散在液体之中，在较小间隙的通道中，气泡多为圆柱形，较大间隙的通道则为球状；弹状流的气弹多数有圆润的头部和扁平的主体，气弹和液相交叉分布，液相中常含有大量弥散的小气泡。在窄矩形通道中，由于通道间隙的限制，泡状流即使在气相速度较低时也难以发现，气泡提前聚合形成帽状流的流型，气泡头部呈半圆型，下部近似为水平状；弹状流与常规矩形通道近似相同，但窄通道弹状流的液相部分内一般仅含有少量的气泡，有时气弹中会有液滴出现。

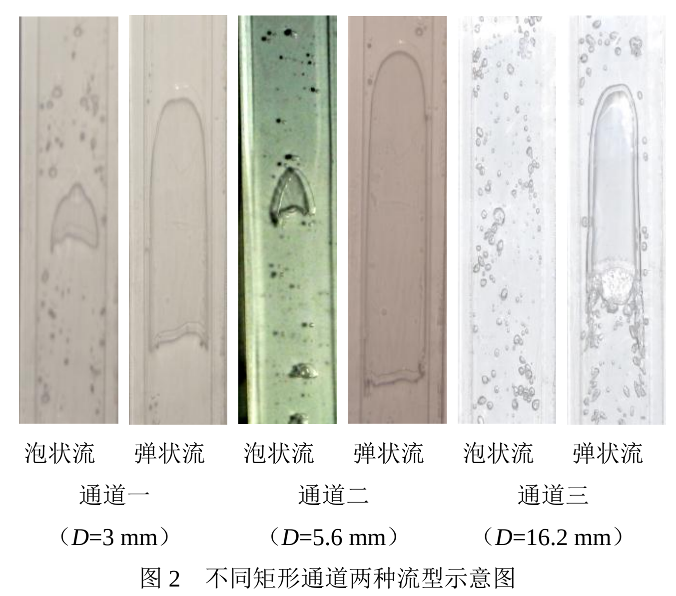


图 2 不同矩形通道两种流型示意图

Fig. 2 Two flow patterns in different kinds of rectangular channels

3 泡状流—弹状流转换边界判定方法

3.1 泡状流—弹状流转换边界对比

选取从文献 2 和文献 11 得到的矩形通道中泡状流向弹状流转变边界，并与实验中得到的结果进行比较，如图 3 所示（图中 s 为通道间隙，w 为宽边长度，D 为当量直径，尺寸单位均为 mm）。对比发现矩形通道中泡状流向弹状流转变主要与通道间隙有关，当通道间隙小于 2 mm 时，间隙为 0.3、1.0 和 1.6 mm 的转换边界几乎重合；当通道间隙大于 2mm 时，随着通道水力直径的增加，转换边界左移，由于间隙变小造成的束缚减弱，壁面的剪切作用也相应变小，气泡间更容易实现碰撞和聚合，弹状流出现时间相应提前。

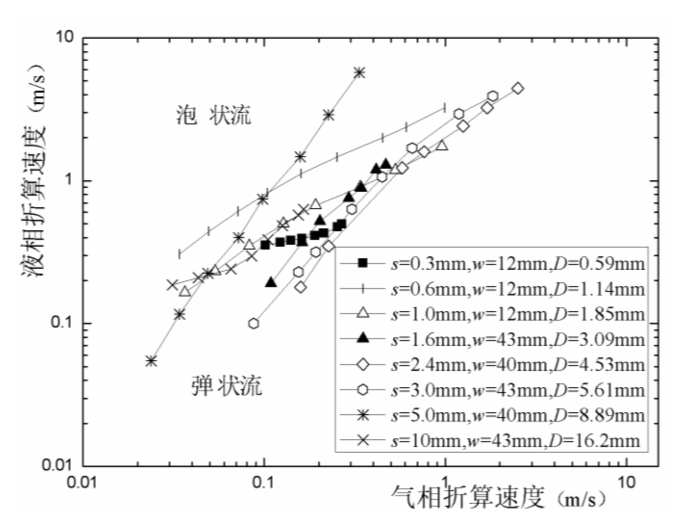


图 3　不同矩形通道分布系数计算比较

Fig. 3　Comparison of different corrections for distribution parameter in rectangular channels

3. 2 泡状流—弹状流转换边界判定准则评价

3. 2. 1 泡状流—弹状流转换边界判定准则

许多学者都采用漂移流的公式作为泡状流向弹状流转变的判别式，Jones 和 Zuber[8]（1975）提出基于矩形通道的转换边界判定准则，形式为

$$j_f=(\frac{1}{0.3C_0}-1)j_g-\frac{1}{C_0}(0.23+0.13s/w)\sqrt{\Delta\rho g w/\rho_l}$$

（1）

Ishii[5]（1977）得到了矩形通道泡状流——弹状流转换准则，指出气泡直径大小 D_b 影响了临界空泡份额的值：

$$j_f=(\frac{1}{\alpha C_0}-1)j_g-\frac{\sqrt{2}}{C_0}(\frac{\sigma g\Delta\rho}{\rho_l^2})^{1/4}(1-\alpha) \quad (2)$$

其中，$\alpha=0.2$ 当 $s<D_b$，

$$\alpha=\frac{s}{20D_b}+0.1 \text{ 当 } D_b\leqslant s\leqslant 3D_b$$

$$\alpha=0.3 \text{ 当 } s>3D_b$$

Taitel（1980）[6]和 Sadatomi（1982）[1]相继提出了适用范围较为宽泛的转换关系式，形式上分别为

$$j_f=0.56j_g-1.15(\sigma g\Delta\rho/\rho_l^2)^{1/4} \quad \text{(Taitel)} \quad (3)$$

$$j_f=(\frac{1}{0.3C_0}-1)j_g-\frac{0.35}{C_0}\sqrt{gD_e} \quad \text{(Sadatomi)} \quad (4)$$

可以看出，基于漂移流模型提出的转换准则大部分含有漂移流分布系数 C_0，因此需要得到不同矩形通道内分布系数的值。

3. 2. 2 矩形通道内分布系数的计算

漂移流的形式一般为：

$$\langle j_g\rangle/\langle\alpha\rangle=C_0\langle j\rangle+V_{gj} \quad (5)$$

其中<j_g>为平均气相折算速度，<α>为平均空泡份额，<j>为折算速度，V_{gj} 为平均漂移速度。Zuber 和 Findley[9]较早提出了关于分布系数的计算形式 $C_0=1.2\text{-}0.2\sqrt{\rho_g/\rho_l}$，随后 Jones 和 Zuber[8]、Ishii[5]分别对于圆管和窄通道提出了分布系数的计算形式：$C_0=1.2$（Jones and Zuber）和 $C_0=1.35\text{-}0.35\sqrt{\rho_g/\rho_l}$（Ishii）

实验中得到的实验段的总压降 ΔP 由重位压降、摩擦压降和加速压降组成。由于通道是等截面的，在绝热条件下，加速压降可以忽略，摩擦压降 ΔP_f 经由 Chisholm C[10]方法计算得到，则重位压降为

$$\Delta P_g=\Delta P-\Delta P_f \quad (6)$$

而流道内的截面含气率已知时，重位压降亦即：

$$\Delta P_g=[\rho_l(1-\langle\alpha\rangle)+\rho_g\langle\alpha\rangle]gL \quad (7)$$

其中，<α>为两测压点间平均空泡份额，L 为两测压点间距，于是利用压降法计算出的平均截面含气率为：

$$\langle\alpha\rangle=\frac{\rho_L-\dfrac{\Delta P-\Delta P_f}{gL}}{\rho_l-\rho_g} \quad (8)$$

实验得到的结果如图 4 所示，随着矩形通道间隙的减少，漂移流模型的分布系数有逐渐增加的趋势，在窄通道范围，分布系数可以选用 Ishii 进行计算，当通道间隙大于 5 mm 时，分布系数可以近似为 1.2。

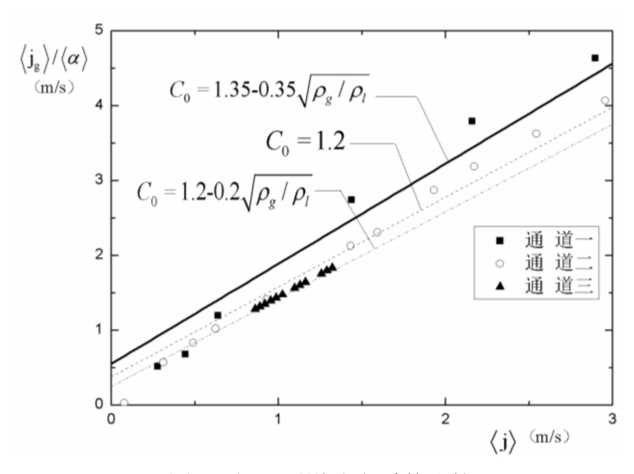


图 4　矩形通道分布系数比较

Fig. 4　Comparison of distribution parameter in rectangular channels

3. 2. 3 泡状流——弹状流转换准则评价

根据得到分布系数的计算方法，对四种转换准则进行计算，误差分析结果如表 1 所示。在八种矩形通道内泡状流向弹状流转换准则的计算中，对尺寸较小的通道 Ishii 模型的平均误差比较小，因此 Ishii 模型可以用于窄矩形通道，而对于较大尺寸的矩形通道，四种模型的误差都较大，适用性不高。Ishii 模型通过比较气泡尺寸与矩形管道间隙得到变化的空泡份额，而其余四种模型则认为临界空泡份额保持不变，因此临界空泡份额的计算是泡状流向弹状流转换准则的关键。

表 1　模型平均绝对误差及平均误差比较(单位：%)

Table 1　Mean deviation and average deviation calculated for different correlations　(unit: %)

通道尺寸（mm）	Ishii	Jones-Zuber	Taitel	Sadatomi
s=0. 3，w=12	24.7	29.6	50.3	53.4
s=0. 6，w=12	66.6	70.8	81.5	83.1
s=1，w=12	52.9	65.3	66.2	69.3
s=1.6，w=43	10.3	13.5	61.2	66
s=2.4，w=40	27	46.5	29.9	33.6
s=3，w=43	43.6	18.7	50	56.4
s=5，w=40	64.1	59.4	79.6	95
s=10，w=43	62.4	84.9	99	100

3. 3 泡状流——弹状流转换准则修正

泡状流向弹状流转换的原因，经典理论认为是气泡间的相互碰撞、合并导致气泡的尺寸增加，以至于超过通道的直径而形成气弹的结果，因此气泡的初始尺寸对于流型转换的临界空泡份额是有很大影响的[12]。Ishii 模型在窄矩形通道中的适用性很好，这主要原因是在窄矩形通道的实验研究中，气泡初始尺寸基本一致，对于流型转变容易形成共识；而在较大间隙的通道，由于气液混合方式不一致，造成气泡初始尺寸相差较大，模型一认为临界空泡份额仅在 0.2-0.3 变化，因此有必要在较大间隙的矩形通道范围对 Ishii 模型的临界空泡份额计算式进行修正。

文献[12]通过对气泡碰撞对于泡——弹状流转换进行数值计算，得到了一条通用的、关于气泡初始尺寸影响气泡碰撞率的通用曲线，研究表明当 η（$\eta=D_b/D$）在 0.04-0.4 范围内，临界空泡份额与气泡初始尺寸的关系是

$$\alpha = 1.18[(0.664 + 0.876\eta)^{-1} - 1] \qquad (9)$$

将通过高速摄影捕捉到通道二与通道三的气泡初始尺寸应用到公式（9）中，并用 Ishii 的转换准则关系式的公式进行计算，得到新的泡——弹状流转换边界，与实验值的对比情况如图 5 所示，实验结果与预测结果误差很小，因此在较大间隙的矩形通道中可以采用公式（9）计算临界空泡份额。

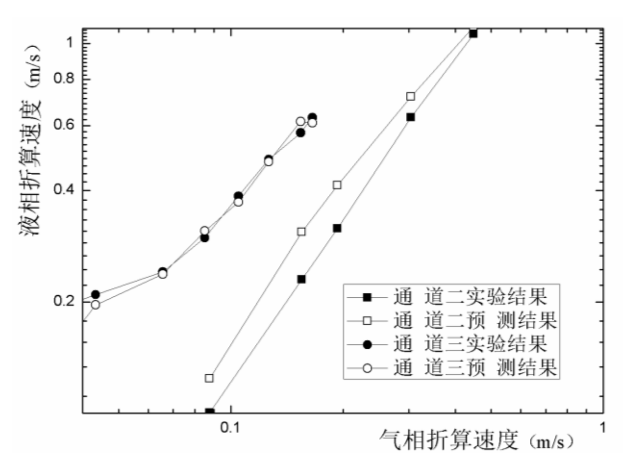


图 5　实验值与预测值比较

Fig. 5　Comparison between experimental data and new correction

4 结论

（1）基于漂移流思想，对三个实验段的分布系数进行计算，结果表明在窄矩形通道中可以选用 Ishii 提出的分布系数计算式，而常规矩形通道中分布系数为 1.2。

（2）矩形通道间隙大于 2 mm 时，随着通道水力直径的增大，转换边界左移。

（3）在窄通道范围可以采用 Ishii 提出的漂移流公式作为流型转换边界。

（4）常规矩形通道中，转换准则中的临界空泡

份额与气泡初始尺寸有关，使用赵建福计算临界空泡份额的计算式修正 Ishii 计算空泡份额的公式，转换边界的预测与实验结果符合程度较好。

参考文献

[1]Sadatomi S Y, Saruwatari S. Two-phase flow in vertical noncircular channels［J］. International Journal of Multiphase Flow，1982，8（6）：641-655

[2]Mishima K，Hibiki T. Some characteristics of gas liquid flow in narrow rectangular ducts［J］. International Journal of Multiphase Flow，1993，19（1）： 115-124

[3]Wilmarth T, Ishii M. Two-phase flow regimes in narrow rectangular vertical and horizontal channels［J］. International Journal of Heat Mass Transfer , 1994，37（12）：1749-1758

[4]Hibiki T, Mishima K.Flow regime transition criteria for upward two-phase flow in vertical narrow rectangular channels［J］. Nuclear Engineering and Design，2001，203（2001）：117- 131

[5]Ishii M. One-dimensional drift-flux model and constitutive equations for relative motion between phases in various two phase flow regimes［R］. ANL Report, 1977, ANL-77-47

[6] Taitel Y, Bornea D. Modelling flow pattern transitions for steady upward gas-liquid flow in vertical tubes［J］. American Institute of Chemical Engineers，1980，26（3）, 345-354

[7] Kandlikar S G. Fundamental issues related to flow boiling in minichannels and microchannels［J］. Experimental Thermal and Fluid Science，2002，2（26）：389-407

[8] Jones O C, Zuber N. The interrelation between void fraction fluctuations and flow patterns in two-phase flow［J］. International Journal of Multiphase Flow，1975，2（3）：273-306

[9] Zuber N, Findlay J A. Average volumetric concentration in two-phase flow systems［J］. Journal of Heat Transfer，1965，87：453-468

[10] Lucas D, Krepper E, Prasser H M. Use of models for lift, wall and turbulent dispersion forces acting on bubbles for poly-disperse flows［J］. Chemical Engineering Science，2007，62（15）：4146-4157

[11] XU Jinliang. Experimental study on gas-liquid two-phase flow regimes in rectangular channels with mini gaps［J］. International Journal of Heat and Fluid Flow，1999，4（20）：422-428

[12]赵建福. 气泡初始尺寸对泡—弹状流流型转换的影响［J］.工程热物理学报，2004，26（5）：793-795

ZHAO Jianfu.Influence of bubble initial size on bubble-to-slug transition［J］. Journal of Engineering Thermophysics，2004，26（5）：793-795